



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

PŘÍČINY VZNIKU TRHLIN V OBJEMNÝCH VZORCÍCH Z HLINÍKOVÝCH SLITIN PŘIPRAVOVANÝCH TECHNOLOGIÍ SLM

THE ORIGIN OF CRACKS IN BULK ALUMINIUM ALLOYS PREPARED BY
SLM TECHNIQUE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Tomeček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Roman Štěpánek, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství
Student: **Michal Tomeček**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Roman Štěpánek, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Příčiny vzniku trhlin v objemných vzorcích z hliníkových slitin připravovaných technologií SLM

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při zpracování materiálů metodou SLM mohou v jejich struktuře vznikat trhliny, kdy vznik defektů ovlivňují různé faktory (typ zpracovávaného materiálu, procesní parametry apod.). Výskyt vad ve struktuře objemných vzorků výraznou měrou determinuje jejich výsledné vlastnosti, jako jsou mechanické charakteristiky. Snížení pravděpodobnosti vzniku těchto defektů a redukci jejich množství, např. úpravou detailů procesu SLM, lze dosahovat stejných, či lepších vlastností ve srovnání s materiály vyráběnými konvenčními technologiemi (odlévání, tváření). V rámci bakalářské práce se student bude zabývat zejména příčinami vzniku trhlin u objemných vzorků vyráběných technologií SLM a možnostmi minimalizace jejich výskytu.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce bude zpracování literární rešerše popisující dosavadní znalosti o příčinách vzniku a možnostech odstranění či minimalizace výskytu vad ve struktuře materiálů zpracovávaných technologií SLM (zejména Al slitin řady 2xxx). V experimentální části práce bude analyzován charakter přítomných mikrostrukturních defektů pomocí standardních technik (světelná a elektronová mikroskopie). Výsledkem práce by měl být návrh optimalizace SLM procesu přípravy studované slitiny.

Seznam doporučené literatury:

OLAKANMI, E. O., COCHRANE, R. F., DALGARNO, K. W. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure and properties, Progress in Materials Science, 2015, Vol. 74, s. 401-477.

ZHAO, M., WHITE, D. R., DEBROY, T. Current issues and problems in laser welding of automotive aluminium alloys, International Materials Reviews, 1999, Vol. 44, s. 238-266.

CAO, X., WALLACE, W., IMMARIGEON, J. P., POON, C. Research and progress in laser welding of wrought aluminum alloys. II. Metalurgical microstructures, defects and mechanical properties, Materials and Manufacturing Processes, 2003, Vol. 18, s. 23-49.

MALEK GHANI, F., SHEIKHI, M., TORKAMANY, M. J., SABBAGHZADEH, J. The relation between liquation and solidification cracks in pulsed laser welding of 2024 aluminium alloy, Materials Science and Engineering A, 2009, Vol. 519, s. 167-171.

HUANG, C., CAO, G., KOU, S. Liquation cracking in partial penetration aluminium welds: assessing tendencies to liquate, crack and backfill, Science and Technology of Welding and Joining, 2004, Vol. 9, s. 149-157.

SHEIKHI, M., MALEK GHAINI, F., TORKAMANY, M. J., SABBAGHZADEH, J. Characterisation of solidification cracking in pulsed Nd:YAG laser welding of 2024 aluminium alloy, Science and Technology of Welding and Joining, 2009, Vol. 14, s. 161-165.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

V práci je rozebrán obecný popis tvorby součástí metodou SLM („Selective Laser Melting“), a ta náleží do skupiny metod ALM („Additive Layer Manufacturing“). V první části je rozebrán obecný technologický postup metody SLM. V druhé části je věnována pozornost vlivu procesních parametrů na výslednou součást a nevýhody spojené s použitím hliníku u těchto metod. V poslední části je popsán provedený experiment. Hlavním cílem práce je řešit vliv procesních parametrů SLM na relativní hustotu a vlastnosti vyrobené součásti u hliníkových slitin a analýza provedeného experimentu.

Klíčová slova

Selective Laser Melting, Additive Layer Manufacturing, solidifikační a likvační trhliny, porozita

Abstract

This thesis aims to analyse the general character of manufacturing parts via the SLM (Selective Laser Melting) method, which belongs to the methodical group ALM (Additive Layer Manufacturing). In the first part the general technological process of SLM is described. In the second part the main focus is on the resulting influence of the procedural parameters and cons of using aluminium in SLM process. In the third and the last part the experiment is analysed. The main goal of this thesis is the research of influence of the procedural parameters on relative density and properties of aluminium alloys made by the SLM method and the analysis of the experiment that was carried out.

Keywords

Selective Laser Melting, Additive Layer Manufacturing, solidification and liquation cracks, porosity

Bibliografická citace

TOMEČEK, M. *Příčiny vzniku trhlin v objemných vzorcích z hliníkových slitin připravovaných technologií SLM*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Roman Štěpánek, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Romana Štěpánka, Ph.D. a s použitím literatury a pramenů, které jsou uvedeny v seznamu použité literatury na konci této práce

V Brně 25. 5. 2018

.....

Michal Tomeček

Poděkování

Tímto bych chtěl vyjádřit svůj dík vedoucímu mojí práce, panu Ing. Romanu Štěpánkovi, Ph.D. za velmi ochotné vysvětlení problematiky, formální i odborné poznámky a především za jeho čas, který mi věnoval, ať už v průběhu roku, nebo během prováděného experimentu.

Dále bych rád poděkoval všem těm, kteří mě v průběhu posledního roku podporovali, neboť bez oné zmíněné podpory by tato práce nikdy nespátřila světlo světa.

Obsah

1. Úvod.....	9
2. Aditivní technologie.....	10
2.1. Přehled současného stavu poznání	10
2.2. Technologie aditivních metod	10
2.3. Srovnání SLM a SLS technologií	12
3. Procesní parametry SLM technologií	14
3.1. Vzdálenost šraf	16
4. Mechanické vlastnosti součásti vytvořené technologií SLM.....	17
4.1. Tvrdost.....	17
4.2. Pevnost.....	17
4.3. Tažnost.....	18
4.4. Únavové vlastnosti	18
4.5. Minimalizace porozity v SLM.....	19
5. Nevýhody používání hliníku v technologii SLM.....	22
5.1. Oxidace	22
5.2. Solidifikační a likvační trhliny	23
5.3. Balling efekt	24
6. Materiál a použité metody	26
6.1. Příprava metalografických výbrusů	27
7. Výsledky	28
8. Závěr	34
9. Seznam použitých zdrojů	35
10. Seznam použitých zkratk a symbolů.....	38

1. Úvod

V dnešní době, kde se neustále potýkáme s otázkou, jak zlevnit a urychlit výrobní proces, jsou to právě aditivní technologie, které by nám mohly umožnit revoluci ve výrobě součástí, i přestože se tato událost neočekává v nejbližší době. Také z ekologických důvodů jsou aditivní technologie stále žádanější, protože na rozdíl od konvenčních metod výrob součástí, aditivní technologie nezanechávají téměř žádný nevyužitý materiál a odpad, což bývá preferovanou volbou v dlouhodobé vizi výrobních procesů.

V poslední době využití a celkový význam aditivních technologií vzrůstá rapidní rychlostí a to nejenom v odvětvích, kde by se zdálo, že jeho využití bude mít okamžitou odezvu, ale právě naopak i v odvětvích, kde bychom sklon k těmto technologiím neuvažovali za přínosné. Mezi aditivní technologie spadá dnes již velké množství způsobů, jak takto postupně zhotovit žádaný předmět. V těchto aditivních metodách se používá práškový polotovar jako hlavní stavební prvek součástí. Tento prášek musí projít tavením a poté tuhnutím vznikne požadovaná součást. Práškové metody využívají například metody „fused deposition modeling“ (FDM), „selective laser sintering“ (SLS) a „selective laser melting“ (SLM).

Metoda SLM a aditivní technologie obecně jsou závislé na použitém materiálu, jeho struktuře a na procesních parametrech jako například rychlosti skenování, výkon laseru, výška nanášené vrstvy či samotná skenovací strategie. Tyto procesní parametry ovlivňují finální produkt, převážně výslednou porozitou, která bývá většinou klíčovým parametrem, od něž se odvíjí další mechanické vlastnosti materiálu jako tvrdost, pevnost a únavová životnost, nebo náchylnost ke vzniku trhlin aj.

Použití metody SLM u některých materiálu je však problematické, protože např. u hliníkových slitin vytvořených metodou SLM můžeme sledovat abnormální vznik a tvorbu trhlin. Jelikož slitiny hliníku jsou jedny z nejpoužívanějších slitin k tváření s velkou měrnou pevností a dále je hliník velice významný svou nízkou cenou na trhu a dobrou kombinací mechanických vlastností, které se uplatňují zejména v letectví, automobilním průmyslu, jednoúčelových strojů a lékařských pomůcek, je problém vzniku a původu trhlin v těchto slitinách velmi aktuální.

V předložené práci se budu zabývat zpracováním slitin ve formě prášku (především pomocí metody SLM) a zkoumat vznik zmíněných trhlin na základě již zveřejněných vědeckých prací a experimentů. Výsledné poznatky budou podloženy vlastním experimentem provedeným na vzorcích slitiny 2618.

2. Aditivní technologie

Díky aditivním technologiím a jejich rozvoji je možné uvažovat do budoucna o změnách nejenom ve strojírenském průmyslu, ale i v jiných odvětvích jako například v lékařství. Následně díky zvýšené produkci součástí pocházejících právě z 3D tiskáren bude docházet k další průmyslové revoluci a posunu pracovních sil. Export takového výrobku může být poté jen otázkou posláním dat z jednoho počítače do druhého po celém světě. [1]

2.1. Přehled současného stavu poznání

Aditivní výroba je proces tvorby trojrozměrných pevných objektů, kdy se materiál postupně přidává ve vrstvách (v podobě tekutých molekul nebo práškových zrn, které se následně spojují) na základě modelu nahraného z CAD či AMF souboru. Pro tuto výrobu se využívá tzv. 3D tisku, který můžeme vidět i u technologií „rapid prototyping“. Výsledné součásti, ať už jakkoliv tvarované, nebo s rozlišnou geometrií, mohou být právě těmito způsoby vytvořeny bez procesních omezení, které můžeme najít u konvenčních metod tvorby součástí. [2]

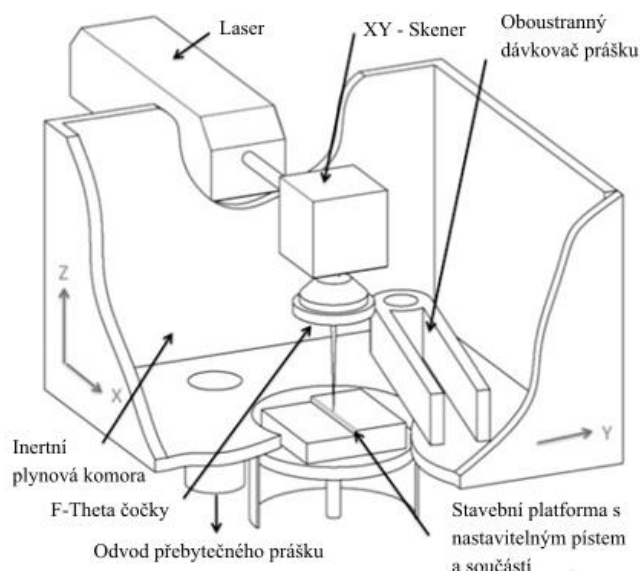
Prvotním způsobem jak aplikovat 3D tisk byl na bázi litografie a uplatnil ji Charles W. Hull v roce 1984. Tato technologie „Stereolitography“ je dodnes nejpoužívanější metodou 3D tisku. Díky tomuto objevu je možné vytvářet předměty, aniž bychom je museli opracovávat z větších kusů materiálu a tak zabraňujeme zbytečné ztrátě a znehodnocování materiálu. [3]

2.2. Technologie aditivních metod

SLM je jednou z aditivních technologií, která umožňuje tvorbu strukturovaných součástí v sérii s identickými mechanickými vlastnostmi bez další potřeby obrábění či tepelných úprav. Obzvláště hliník je velice vhodný pro ekonomicky navržené součásti díky jeho nízké váze a vysoké kvalitě mechanických a chemických vlastností. Bohužel technologie SLM díky svému náročnému procesu tvorby a provozu ještě není zdaleka vhodná pro sériovou výrobu, nýbrž jen pro tvorbu prototypů a jednotlivých součástí. [4]

Co se týče technologií SLM a použití hliníku v těchto technologiích, existuje velice málo publikací a materiálů ze kterých můžeme čerpat. U většiny výzkumů v této oblasti se používalo převážně slitin 6061 z důvodu předchozích úspěchů použití této slitin během technologie SLM. [5]

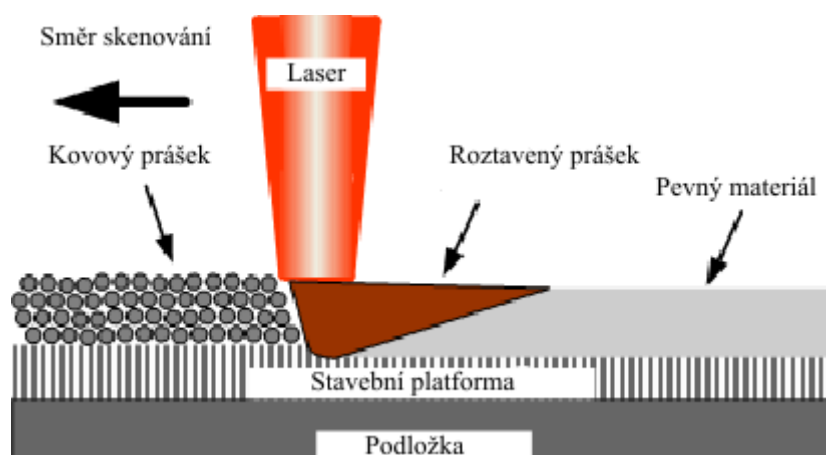
Výrobní stroj (obr. 2.2.1.) se skládá ze základové desky kruhového nebo obdélníkového průřezu, která se hýbe v Z-ové ose. Laserový paprsek sloužící jako zdroj tepla k roztavení prášku se nachází v poloze nad základovou deskou, ale může být použit i systém zrcadel a optických čoček. Laser je napojený na skener X-ové a Y-ové osy do nichž se rozkládá obraz jednotlivých vrstev. Další důležitou částí stroje je dávkovač prášku, který má podobu rovnací lišty. Ten rovnoměrně nanáší připravený prášek po vrstvách. [7]



Obrázek 2.2.1: Výrobní proces SLM [6]

Veškerý proces probíhá v přísně regulované atmosféře, která je před zahájením procesu vakuována a zbavena veškeré vlhkosti. Komora se poté naplní inertním plynem (převážně se používá argon, alternativně dusík). Po této přípravné fázi se ze zásobníku nasype kovový prášek, který je rovnoměrně nanášen dávkovačem prášku. Systém zkontroluje souřadnice prášku a nastavá tavení vrstvy laserem dle připraveného programu. Výsledná výška jedné vrstvy souvisí s nastavením parametrů a použitého kovového prášku. U hliníkových slitin se standardně používá výška přibližně 50 mikrometrů. Poté, co laser prosvítí nanesenou vrstvu, se posune platforma v ose Z – přesně o výšku další vrstvy – a tento proces se opakuje až do konce procesu. [7]

Výkon laseru a všechny potřebné parametry důležité pro průběh tavení musí být vhodně nastaveny, z důvodu nutného natavení předchozí nanesené vrstvy, což umožňuje výsledné propojení jednotlivých vrstev mezi sebou. Bližší náhled na proces tvoření součástí vrstvou metodou a jejím tavením nalezneme na obrázku 2.2.2. [7]



Obrázek 2.2.2: Postup tvorby součástí při užití technologie SLM [8]

2.3. Srovnání SLM a SLS technologií

Princip technologie SLM a SLS je v základu stejný, ale liší se pouze relativní pracovní teplotou. U procesu SLM dochází ke spojování prášku pomocí jeho natavení, proces tedy probíhá nad teplotou tavení daného materiálu. Naopak u procesu SLS dochází k celému procesu těsně pod teplotou tavení daného materiálu, což umožňuje sloučení materiálu (spékání) skrze fúzi v pevném stavu. Kvalita výsledné součásti je srovnatelná u obou metod. [9]

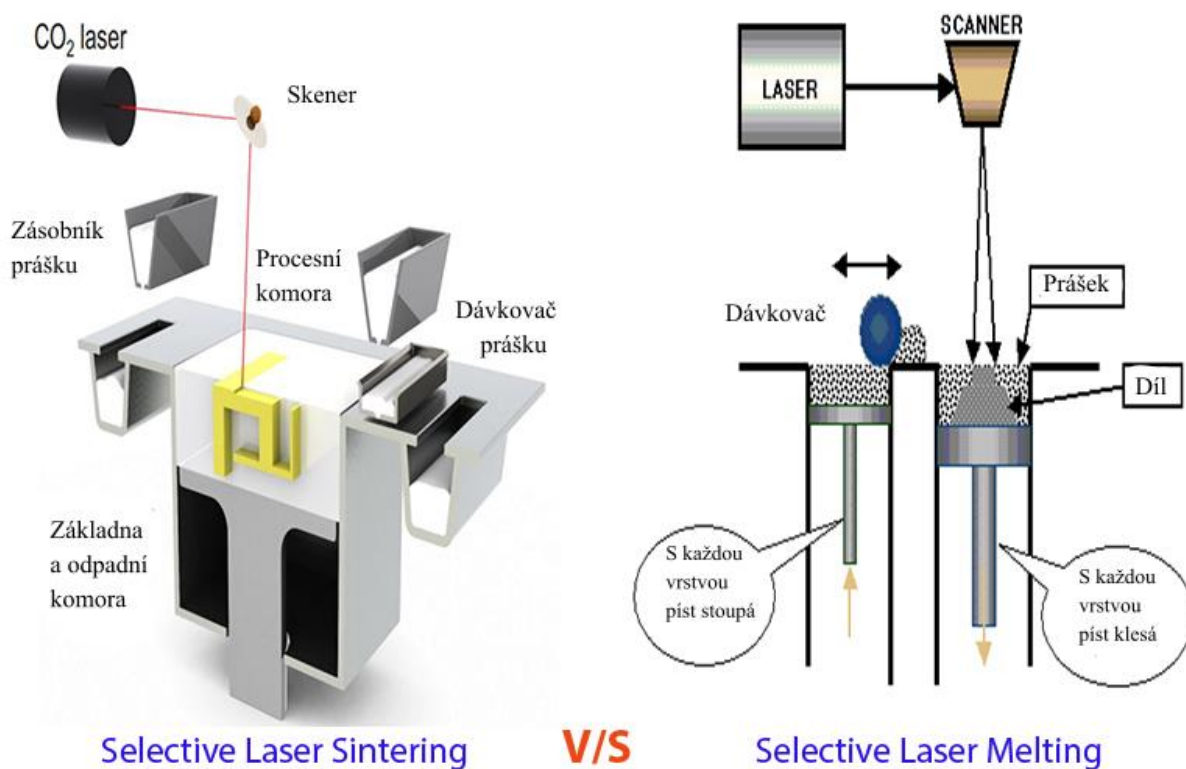
Co se týče procesních odlišností, tak SLS technologie je v tomto ohledu více limitovaná nežli SLM technologie. Ale SLS má také více metod jak spojovat materiál např. DMLS (Direct Metal Laser Sintering), která používá výkonnější laser na spékání materiálu, které u SLM technologií, nejsme schopni vůbec použít. [9]

Obecně používané materiály u obou technologií jsou fundamentálně odlišné, metoda SLM pracuje převážně s korozivzdornými oceli, hliníkovými či titanovými slitinami, kdy u SLM vybíráme materiály na bázi pevnosti, tažnosti a jestliže je to vyžadováno tak i biokompatibilní. U SLS neřešíme natolik mechanické vlastnosti materiálu, jako spíše jeho nízkou cenu a proto obecně spíše pracujeme s plasty, sklem a keramikou, ale neznamená to, že by se nedaly používat i kovové materiály v SLS technologiích (např. u DMLS). Dále se také často objevují (jinak těžko propojitelné) kombinace hliníku, skla a nylonu. [9]

Narozdíl od SLS, je právě SLM technologie velice obtížná na ovládání z důvodu vysokého zatížení laseru. Je důležité zmínit, že SLM součásti mohou být zpracovány jako mnohé svařované součásti. Dále SLM vyžaduje použití podpůrné platformy při tisku, ale ta může usnadňovat přenos a rozložení tepla v součásti a také přispívá prevenci tvarových vad způsobených teplem (roztečení materiálu, nabobtnání vzduchových bublin aj.). SLS je naopak velice jednoduchá na kontrolu a efektivnější než FDM. DMLS také umožňuje dosáhnout tenčích nanášených vrstev než je tomu u FDM. Další výhodou je ten fakt, že samotný nespečený prášek slouží jako platforma ke stavbě součásti a tak není zapotřebí žádných jiných stavebních pomůcek. Výsledná tloušťka je ovlivnitelná použitým materiálem a opracovatelnost je stejná, jako je tomu u jinak obvyklých výrobních technologií. [9]

Výsledkem SLM procesu jsou v podstatě finální součástky (většinou nevyžadující další opracování povrchu či tepelného zpracování), které mají až 99,9% hustoty tvořenou materiálem. Po dokončení SLM, většinou dochází pouze k povrchovým úpravám, kdy povrchové tolerance bývají v rozměru $\pm(0,05 - 0,2)$ mm, ale převážně tyto prvky závisí na použitém stroji pro 3D tisk. U SLS technologií je zase potřebné následné tepelné zpracování, zejména popouštění a žíhání, aby se snížilo vnitřní pnutí. Tolerance bývají ve stejných rozmezech jako u SLM, ale nezáleží tak moc na stroji jako spíše na použitém materiálu. [9]

Z ekonomických důvodů volíme převážně SLM technologie, kde provoz stroje, počáteční vklad do provozu a operace stroje jsou podstatně méně náročné než je tomu u SLS. Když uvažíme počáteční vklady do provozu SLS, následný provoz je zase oproti SLM levnější z důvodu recyklace nevyužitého materiálu – získaný z usazenin ve stroji- a dlouhodobého provozu stroje. [9]

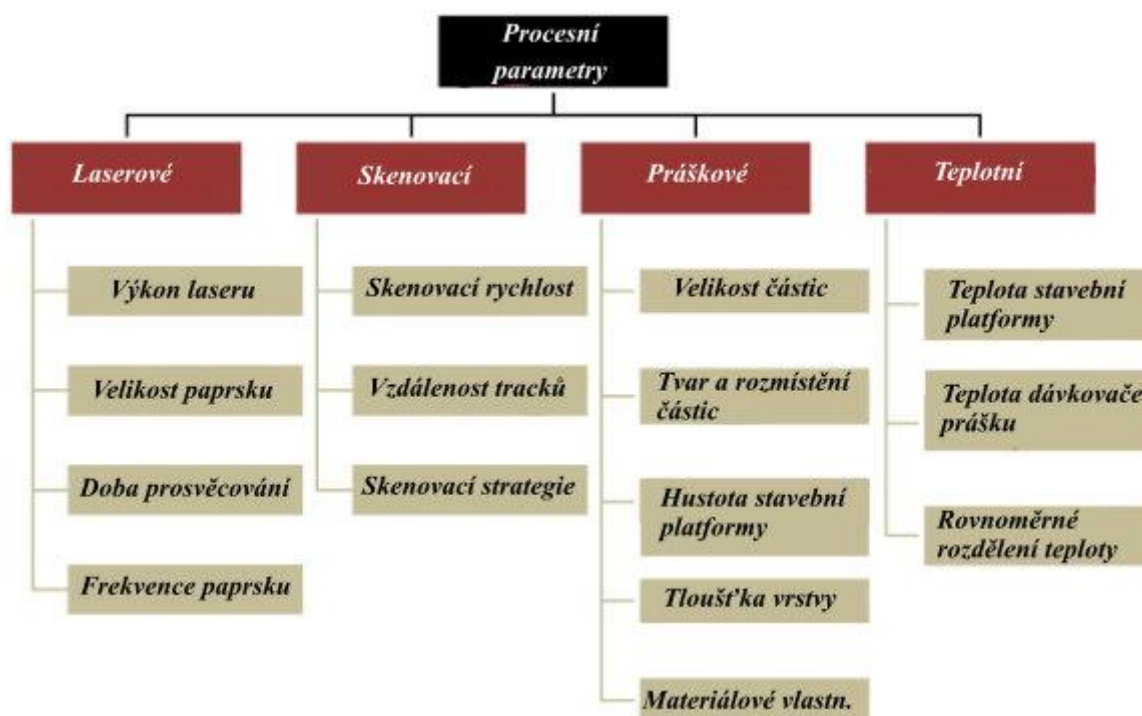


Obrázek 2.3.1: Srovnání technologií SLS a SLM [5]

3. Procesní parametry SLM technologií

V této kapitole se budu věnovat vlivům procesních parametrů na výsledné mechanické vlastnosti součástí vytvořené za pomoci technologie SLM. Nejvýznamnějšími mechanickými vlastnostmi, které chceme takto ovlivňovat, pro nás jsou únavová životnost, tvrdost, pevnost v tahu a houževnatost. Procesní parametry, které můžeme sledovat, rozdělujeme převážně do čtyř významných skupin a to [10]:

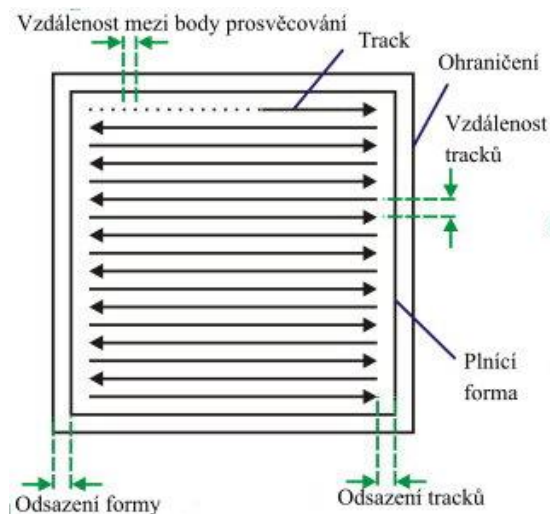
- související s laserem – zejména musíme uvažovat vliv výkonu laseru, který má zásadní vliv na výslednou energetickou hustotu a dále velikost paprsku
- související s rychlostí skenování – zde uvažujeme jak samotnou rychlost skenování, tak i skenovací strategii a vzdálenost tracků
- související s práškem – nejdůležitějšími faktory v této oblasti procesních parametrů jsou velikost částic prášku a tloušťka nanášené vrstvy prášku
- související s teplotou – zde hraje největší roli teplota stavební platformy v průběhu procesu



Obrázek 3.1.: Rozdělení procesních parametrů [6]

Předtím než je vůbec možné začít vyrábět součást za pomoci SLM, je zapotřebí specifikovat prvky základní geometrie. Zejména trasu laseru, hraniční geometrii, geometrii šrafování a geometrii podstavy. Správná optimalizace těchto čtyř geometrií se přenáší následně do výsledných vlastností jako je například povrch součásti po procesu nebo jeho mikrostruktura a mechanické vlastnosti. Co je ale nejdůležitější, je vliv těchto faktorů na výslednou hustotu součásti. [5]

Základní procesní parametry, které jsme schopni kontrolovat, jsou výkon laseru, vzdálenost mezi jednotlivými vrstvami, skenovací strategie, rychlost skenování a vzdálenost tracků (hatch distance). [10]



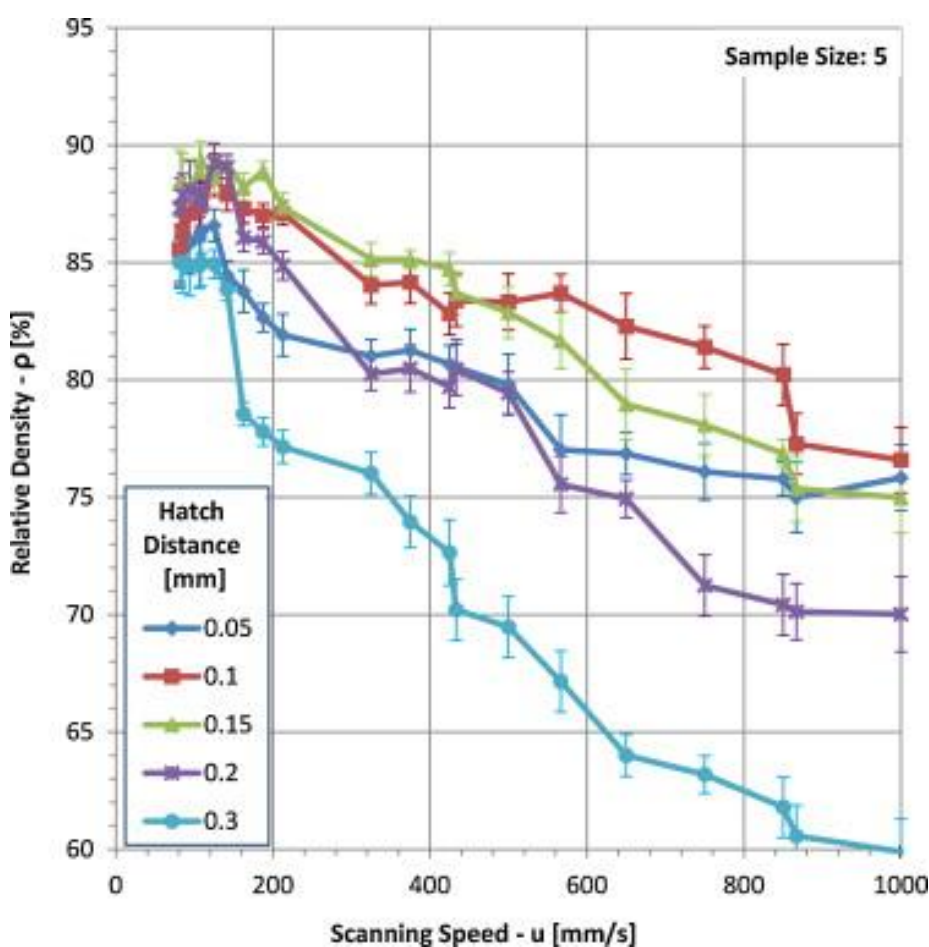
Obrázek 3.2.: Znáznornění parametrů trasy a skenování SLM

Některé parametry SLM procesu jsou spolu obvykle do jisté míry provázané. Olakanmi *et al.* [11], ve své práci otestoval a popsal skenování jednotlivých vrstev hliníku, slitin Al-Mg a Al-Si za použití CO₂ laseru o různých výkonech laseru a rychlosti skenování. Bylo vyvozeno, že vznik tzv. „balling“ efektu (pomalu tuhnoucí kov, pod nímž se zacelí lůžko materiálu) má co dočinění s velikostí energetické hustoty. Jisté redukce tohoto efektu dosáhl při zvýšení rychlosti skenování, které vedlo ke snížení celkové energetické hustoty. Bohužel toto zrychlování funguje jen do jisté míry, kde od jistých rychlostí dochází k přerušení roztavené linie a vzniku několika kuliček na povrchu kvůli Rayleigh-Taylorově nestabilitě. Následně vyzkoušeli tentýž experiment se silnějším 100 W laserem, kde výsledky ukázaly celkové zvýšení relativní hustoty součásti oproti předchozím experimentům až o 5 %, což dokazuje již zmiňovaný potřebný vyšší výkon laseru u tvorby součástí z hliníkových slitin za pomoci SLM technologie. [11]

3.1. Vzdálenost šraf

Z důvodu nedostatku materiálu týkajících se testování duralu vyráběného pomocí SLM, opět odkazují na fundamentálně velice podobnou problematiku zpracování hliníkové slitiny 6061 od *Louise et al.* [5]. Důležitým výsledkem této práce byl poměr relativní hustoty a skenovací rychlosti s využitím různých vzdáleností šrafování. Všechny výsledky v grafu jsou provedeny laserem o výkonu 100 W.

Z grafu (obrázek 3.1.1), se dá vyčíst, že neoptimálnějším poměrem pro výslednou hustotu tisknutí poskytuje volba 100 - 150 μm širokých šraf a skenovací rychlosti v rozsahu 100 – 200 mm/s. Jak již bylo zmíněno, tato efektivní hodnota velice rychle klesá s rostoucí rychlosti skenování. [5]



Obrázek 3.1.1: Vliv rychlosti skenování na relativní hustotě [5]

4. Mechanické vlastnosti součásti vytvořené technologií SLM

Ačkoliv v pracích od *Olakanmiho et al.* [11] a *Kempena et al.* [13] byly prováděny experimenty na materiálu AlSi10Mg, tak pro účely této bakalářské práce jsou jejich výsledky experimentu relevantní a je tedy možné s nimi pracovat i ve smyslu mechanických vlastností součásti z duralu vyrobené pomocí SLM.

4.1. Tvrdost

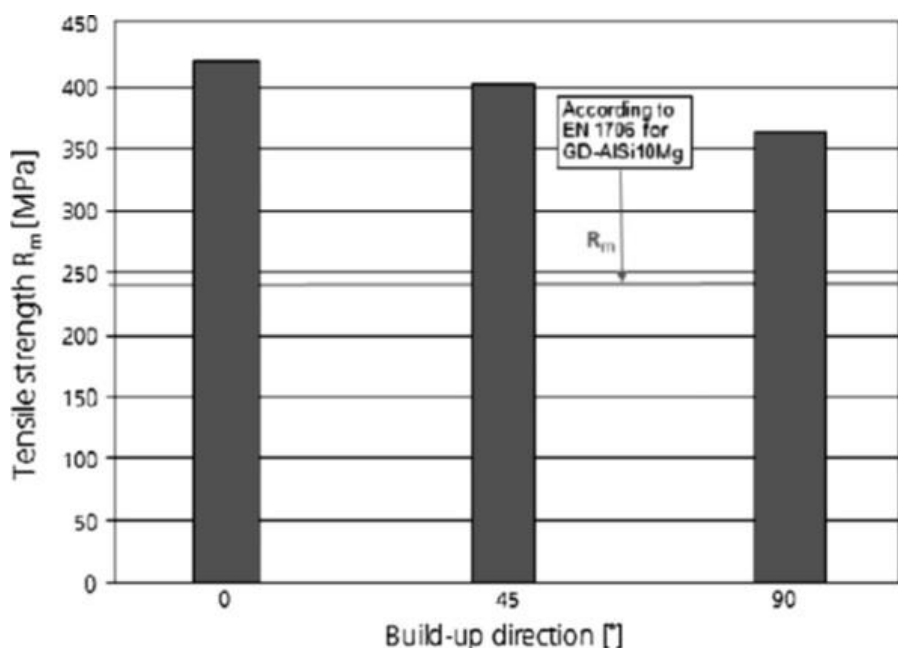
Jedním z nejvýznamnějších a neustále zmiňovaných faktorů ovlivňujících tvrdost je velice rychlé ochlazovací tempo (související s velice rychlou rychlostí skenování) součásti vyrobené za pomoci SLM. Takto vyrobená součást je schopna dosahovat tvrdostí výrazně vyšších nežli tomu je u součástí vyrobené konvenčními metodami. Dalším důsledkem takto rychle ochlazované součásti je zbytkové pnutí uvnitř součásti, které ne vždy musí být nevýhodou. Díky přiměřeným množstvím vnitřního tlakového pnutí je součást schopna zvýšit svoji tvrdost a zabráňuje tak nežádoucímu vzniku plyných pórů v struktuře materiálu během natavení a následného tuhnutí. Uvnitř součásti díky tomu vzniká struktura, která má mnohem jemnější zrnitost, což má za důsledek menší třecí faktor a vyšší odolnost proti opotřebení. Nežádoucím zbytkovým pnutím bývá právě naopak zbytkové pnutí tahové. Dále také byl zjištěn vliv orientace laseru vůči platformě, kdy menší výška vrstvy a menší úhel mezi platformou a laserem mají pozitivní vliv na tvrdost součásti. [11]

4.2. Pevnost

Pevnost v tahu u součástí zhotovených za pomoci technologie SLM je primárně ovlivněna jejich relativní hustotou. Ta je nejvíce ovlivňována rychlostí skenování a výkonem laseru. Kromě relativní hustoty je možné ovlivnit pevnost v tahu materiálovými charakteristikami jako velikostí částic a jejich rozložením, případně i jejich tvarem. Posledním faktorem ovlivňující pevnost v tahu je výška nanášené vrstvy, kde pro optimální pevnost v tahu je zapotřebí mít, co nejmenší výšku vrstvy. Bohužel samotná výška vrstvy je ovlivnitelná jen do jisté míry, jinak dochází k narušování požadované geometrie samotným dávkovačem prášku. [11]

Zajímavým experimentem v práci od *Olakanmiho et al.* [11] je jeho testování pevnosti u součástí vyrobených za pomoci SLS/SLM a naklonění úhlu pod kterým laser prosvěcuje prášek, což můžeme sledovat v obrázku 4.2.1.

Na diagramu můžeme sledovat vliv úhlu prosvěcování vůči poloze stavební platformy v závislosti na pevnosti. Nejhorší mechanické vlastnosti v tomto experimentu mají vzorky, jež byly prosvěcovány ve směru stavby součásti. [11]



Obr. 4.2.1: Mez pevnosti pro směry zatěžování 0°, 45° a 90° [11]

4.3. Tažnost

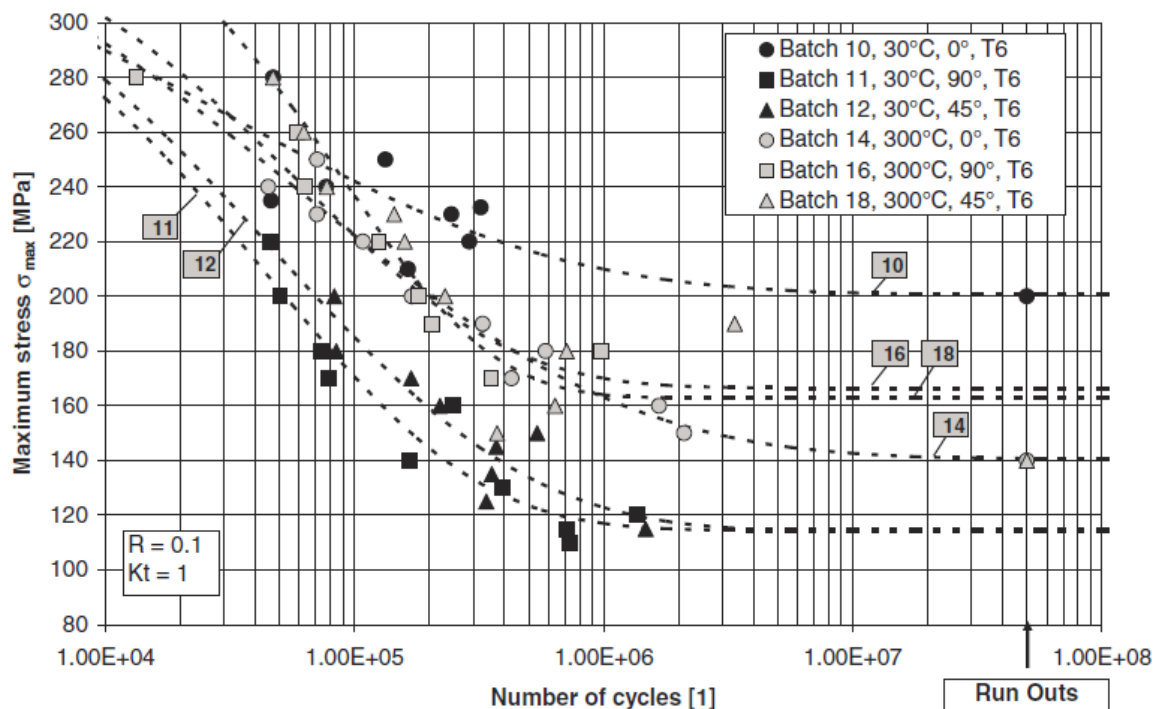
Kritická tloušťka vrstvy závisí na vlastnostech prášku (kap. 4), hlavním faktorem je velikost částic prášku. Čím je kovový prášek hrubší, tím větší hodnotu má kritická tloušťka vrstvy. S rostoucí tloušťkou vrstvy však dochází k menšímu natavení předešlé vrstvy, a proto je oslabena mezivrstvová vazba. Oslabení se projeví výrazněji při namáhání v ose Z (obr. 5.1), protože jsou defekty kolmé k zatížení větší. Pokud je tedy použitý prášek hrubší, snižuje se pevnost materiálu, ale naproti tomu narůstá tažnost. Použití hrubšího zvyšuje tažnost pouze do určité hodnoty, při dalším zvětšování výchozích kovových částic prášku již dochází k oslabení propojení mezi vrstvami a tím k poklesu tažnosti. [3]

4.4. Únavové vlastnosti

O únavové životnosti materiálu rozhoduje přítomnosti pórů, vnitřních staženin a dalších vad. Jmenované nedokonalosti se vyskytují zejména na rozhraní jednotlivých vrstev a způsobují zmenšení nosného průřezu. Působí též jako koncentrátoři napětí a zkracují únavovou životnost součástí. V případě součástí vyrobených pomocí SLM je oproti součástem vyráběných odléváním vyšší pravděpodobnost výskytu pórů. Pokud se póry nachází v povrchové nebo podpovrchové vrstvě, ovlivňují nejvíce únavový život, protože fungují jako koncentrátoři napětí a stávají se tak častými místy iniciace trhliny (obr. 5.2). K šíření dochází, pokud velikost póru přesáhne kritickou hodnotu. Proto je vhodné, aby materiál obsahoval co nejmenší počet pórů, případně aby jejich velikost byla menší než kritická.

V práci *Brandla et al.* [12] můžeme sledovat cyklicky zatěžované vzorky ze slitiny AlSi10Mg, které byly vyrobeny využitím technologie SLM. Testovaným parametrem byla teplota podpůrné platformy, kterou zahřívali buďto na 30°C, nebo 300°C. Dále se rozhodli

některé vzorky tepelně zpracovat do stavu T6, tj. po rozpouštěcím žíhání a umělém stárnutí. Následující graf znázorňuje jejich Wöhlerovy křivky.

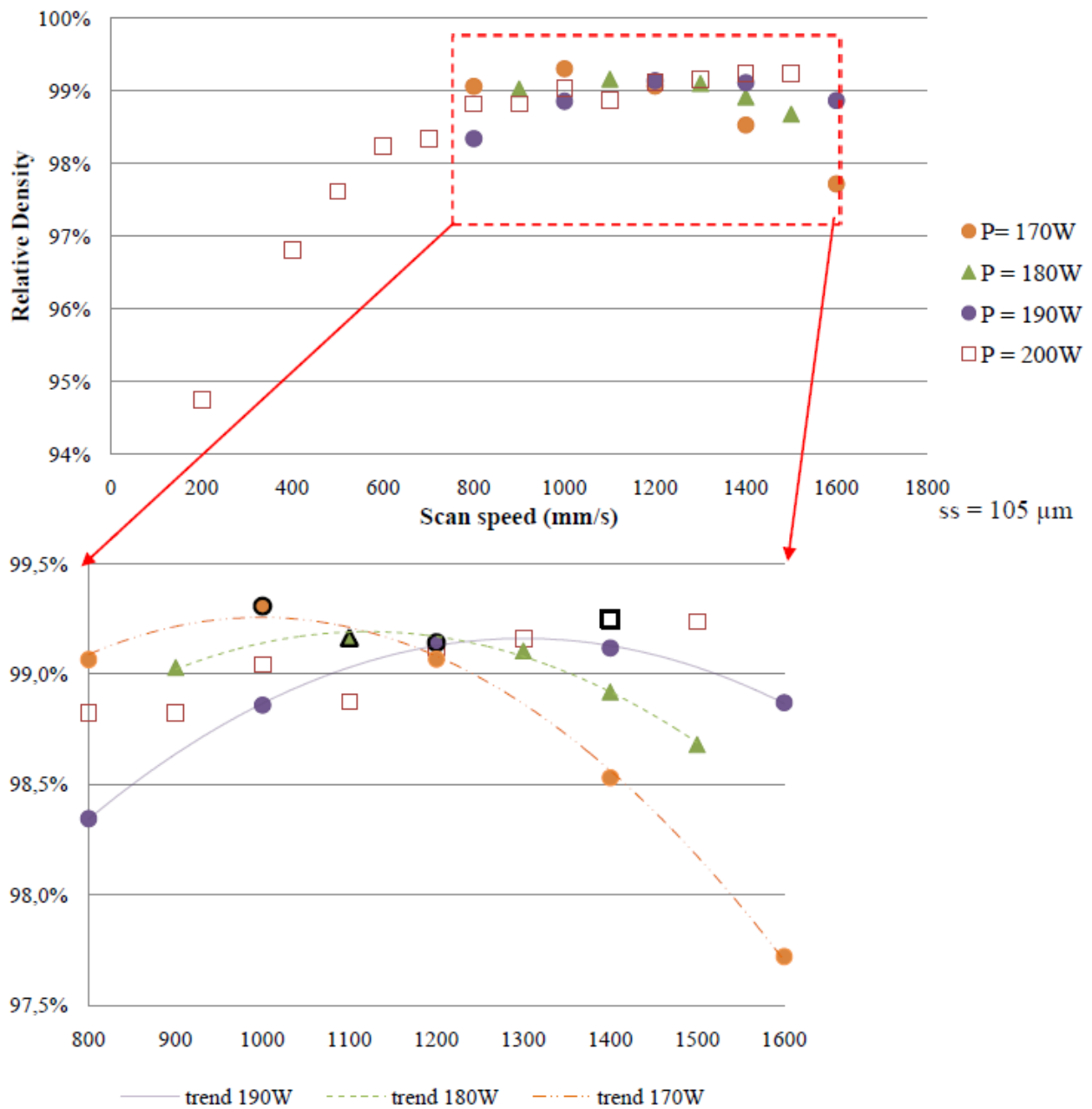


Obrázek 4.4.1: Vliv teploty platformy na únavovou pevnost součásti [12]

Z výsledků testu bylo vyvozeno, že u vzorků tisknutých na platformách o 30°C se projevují nejlepší únavové vlastnosti u vzorků tisknutých pod úhlem 0°. U vyšší teploty platformy, vzorky nevykazovaly radikální odlišnosti mezi sebou nezávisle na úhlu tisknutí. Je možné si všimnout, že vzorky tisknuté technologií SLM vykazují vysokocyklovou únavovou pevnost podstatně vyšší, než u konvenčních způsobů, které bývají kolem 90 MPa. [12]

4.5. Minimalizace porozity v SLM

Z důvodu nedostupnosti studie, která by pojednávala o součástech, jež by měly relativní hustotu blízkou 100% hodnotě (ve výzkumech se neuvádí porozita, nýbrž relativní hustota materiálu), je zapotřebí odkázat na jiný, ale fyzikálně-chemicky podobný referenční materiál, kde tyto požadavky můžeme sledovat. V této studii od *Kempena et al.* [13] je rozebíráno podrobně testování materiálu AlSi10Mg. Poukázali na nutnost přesného složení zpracovávaného prášku. Dodavatelé, od kterých odebírali práškový materiál, měli velmi odlišné obsahy křemíku. Normalizovaný obsah křemíku v této slitině bývá 9 – 11 %, zatímco u jednoho z dodavatelů obsah křemíku měl hodnotu 8,05 %. Kvůli těmto hodnotám se i výrazně lišily hodnoty výsledků jednotlivých testovaných prášků. Dalším zjištěním této práce bylo, že závislost relativní hustoty na rychlosti skenování má u různých výkonů laseru vždy jinou hodnotu extrému, což můžeme vidět na obrázku 4.5.1.



Obrázek 4.5.1: Vliv rychlosti skenování na relativní hustotě materiálu AlSi10Mg [13]

V práci od *Aboulkhair et al.* [10] byl zkoumán vliv změn skenovacích rychlostí za použití laseru o konstantním výkonu 100 W. Z tohoto experimentu bylo vyvozeno, že nejvyšší relativní hustota dosažená pro tento materiál je 99,77 % a to s procesními parametry – vzdálenosti šraf 50 μm a rychlost skenování 500 mm/s. Tato hodnota relativní hustoty se dá považovat za velký úspěch, jelikož standardní hodnoty relativní hustoty naměřené u součástí vyrobené konvenčními metodami je 99,85 %.

Buchbinder et al. [4] vyvodili z jejich experimentu, že výrobní rychlost testovaného materiálu AlSi10Mg může být zrychlena za použití 1 kW laseru. Taktéž je výkon tohoto laseru schopen dostat výslednou relativní hustotu součásti nad 99,5 %. Nejlepších výsledků bylo pro nás v ohledu minimalizace porozity dosaženo, když skenovali laserem při výkonu 900 W, rychlosti skenování 1300 mm/s a vzdálenosti šraf 150 μm . Ačkoliv použili velice energeticky náročné procesní parametry, tak i přesto dosáhli výsledné relativní hustoty 99,8 %. Co se týče nejideálnějších procesních parametrů pro rychlost výroby, tak ty byly dosaženy za použití rychlosti skenování 1700 mm/s a vzdálenosti šraf 250 μm . Toto nastavení mělo výslednou hodnotu rychlosti výroby přibližně 21 mm^3/s což lze považovat za velice dobrý výsledek. Dále v závěru práce bylo zmíněno, že výsledná tvrdost nesouvisí s relativní hustotou materiálu.

5. Nevýhody používání hliníku v technologii SLM

Existuje množství problémů a obtíží způsobujících zpracování hliníkových prášků. V první řadě je zapotřebí schopnost vytvořit tenkou vrstvu prášku pro výrobu. Dosáhnout tohoto stavu je náročné, protože hliník je lehký s vysokou viskozitou obzvláště ve vlhkých prostředích. To ve výsledku způsobuje zpomalení nebo také blokáci materiálu v násypkách a dopravních trubkách. Také to způsobuje to, že hliníkové prášky nejsou vhodné pro mnohá zařízení aplikující prášek, ačkoliv by hliník odpovídal velikostí a tvarem částic. [5]

V druhé řadě vysoká odraznost hliníku (až 91%) vyžaduje mnohem vyšší výkon laseru na roztavení materiálu. Tento fenomén můžeme sledovat i z důvodu vysoké tepelné vodivosti hliníku (vzhledem k ostatním materiálům používaných v SLM technologiích, jako například u nerezové oceli či titanu), která vede k rychlé disipaci tepla pryč z místa tavení. Během tvorby první vrstvy je to nejvíce zřejmé, protože tepelná vodivost práškových forem je podstatně menší než vodivost platforem, na kterých se součást staví. [5]

5.1. Oxidace

Největší překážkou pro spékání a tavení hliníkových slitin je oxidace. Během spékání oxidace na povrchu částic zabraňuje difúzi částic, zatímco malé povlaky oxidu na povrchu roztaveného hliníku snižují smáčivost. Jestliže se stane, že takto zoxidovaný hliník je slit s jiným kovem, může dojít k uvěznění oxidů a následnou pórovitost materiálu, která vede k následné tvorbě slabých regionů uvnitř materiálu. U konvenčních metod zpracování hliníku již existují způsoby, jak se těmto problémům vyhnout. U technologií SLM tento problém bývá právě ještě více kritický a musíme zvážit vznik oxidů v tavící lázni, kde vysoce ovlivňují smáčivost k okolním pevným částicím. Kvůli tomuto fenoménu je nejpravděpodobnější, že vysoký výkon laserů, potřebný pro zpracování hliníkových slitin, je následkem nutného probourání těchto oxidů, nežli náročného tavení kovu. [5]

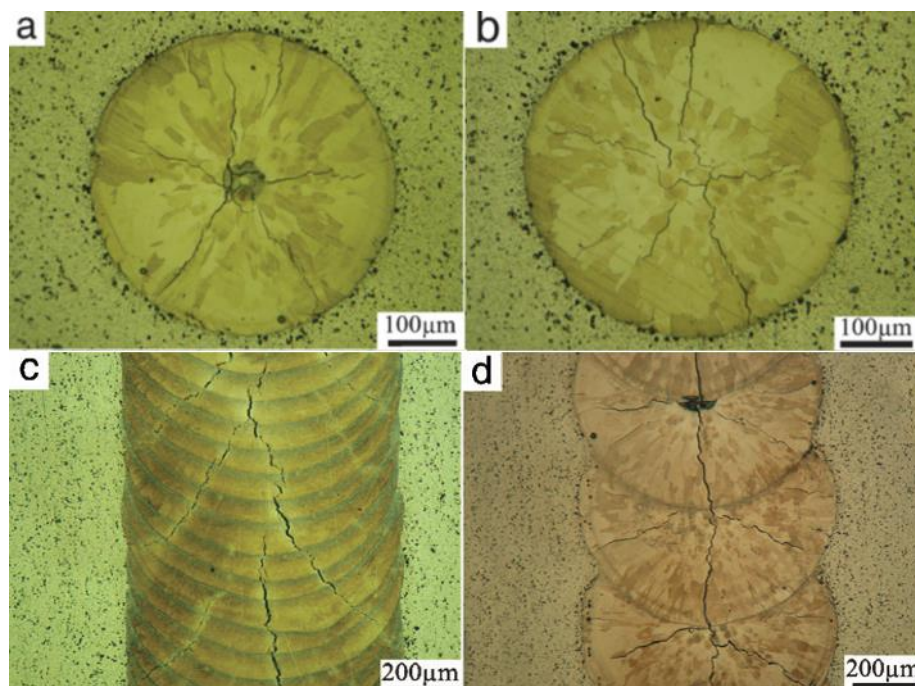
V práci od *Olakanmiho et al.* [11] byl také zkoumán vliv oxidace na proces SLM u hliníkových slitin. Hlavními poznatky z jejich experimentu jsou vysoká energetická náročnost procesu (kvůli potřebnému vysokému výkonu laseru), vliv oxidace a jejího zesilování balling efektu a nevýhody procesu tavení a tuhnutí hliníku, kdy kapilární úhel mezi pevnou a kapalnou fází způsobuje náchylnost k nadměrnému povrchovému napětí při tuhnutí a tedy tvorbě solidifikačních trhlin. Navrhovaným řešením těchto vznikajících problémů je pečlivé řízení a regulace atmosféry během procesu, která by v ideálních případech mohla takto vzniklé oxidy a problémy s nimi spojené kompletně eliminovat. Dále také v práci zmiňují nápady z jiných prací, jako například použití dusíku v ochranné atmosféře, které vede k vázání oxidů na povrchu, ale doposud zaznamenané experimenty, používající takto regulovanou atmosféru, vykazují spíše negativní vliv na finální součást, protože se vodík následně váže na hliník během procesu a dochází k smršťení součásti.

5.2. Solidifikační a likvační trhliny

Ve svařovaných materiálech (a tedy i v materiálech připravených pomocí metody SLM) se objevují dva specifické typy trhlin, trhliny likvační a trhliny solidifikační.

Likvační trhliny se objevují v natavené zóně obvykle jako důsledek velkého množství přídavných prvků ve slitině, které vede ke vzniku eutektika s velmi rozdílnou teplotou tuhnutí, než je tomu u základního materiálu. Ke vzniku trhliny dojde tehdy, pokud mezi kapalnou a pevnou fází vznikne dostatečně vysoké napětí. Tyto trhliny se dají ovlivnit převážně procesními parametry, zejména snížením ztráty energetické hustoty procesu. Dalšími faktory jak tyto trhliny ovlivňovat jsou složení slitiny, parametry prášku, geometrie součásti a rychlost ochlazování. [11,14]

Solidifikační trhliny se v materiálu objevují během nebo okamžitě po solidifikaci a vznikají jako důsledek vnitřního pnutí způsobeného velkým rozptylem teploty tuhnutí materiálu, vysokou teplotní roztažností, případně výrazným smrštěním při tuhnutí. Solidifikační trhliny mají specifickou morfologii, kdy se šíří od fúzní hranice k ose svaru (v případě osamoceného bodového svaru), případně se šíří přes jednotlivé tracky ve směru odpovídajícímu směru svařování, jak můžeme vidět na obrázku 5.2.1. Hliníkové slitiny jsou na tento typ trhlin náchylnější, především z toho důvodu, že hliník má v porovnání s jinými materiály vyšší tepelnou roztažnost (dvojnásobnou oproti oceli). Co se týče konkrétních slitin, tak například slitiny řady 5000 nevykazují náchylnost ke vzniku solidifikačních trhlin během SLM procesu, zatímco slitiny řad 2000 a 6000, jako je tomu v případě této práce, ji vykazují. Tomuto typu trhlin lze zabránit docílením co nejmenšího teplotního gradientu v průběhu solidifikace (jednou z navrhovaných metod u konvenčního svařování je elektromagnetické míchání lázně). [11, 14]



Obrázek 5.2.1.: Vzhled solidifikačních trhlin u laserového svařování:
a), b) osamocený svar, c), d) navazující svary [14]

5.3. Balling efekt

Během laserového procesu SLM je pouze část ozařování vstřebána částicemi na povrchu vrstvy prášku, která je právě nanášena. Zbytek záření proniká skrze povrchové částice do sousedících mezer či částic prášku ve vrstvě, která se nachází přímo pod vrstvou nanášenou. Tímto dochází k snižování povrchové energie kvůli vlivu povrchového napětí. To má za výsledek tvorbu kuliček na povrchu vrchní vrstvy. [15, 16]

Li et al. [16] zkoumali ve své práci právě balling efekt a jeho příčiny a chování. Dle jejich teorie se dá tento fenomén rozdělit do dvou skupin a to:

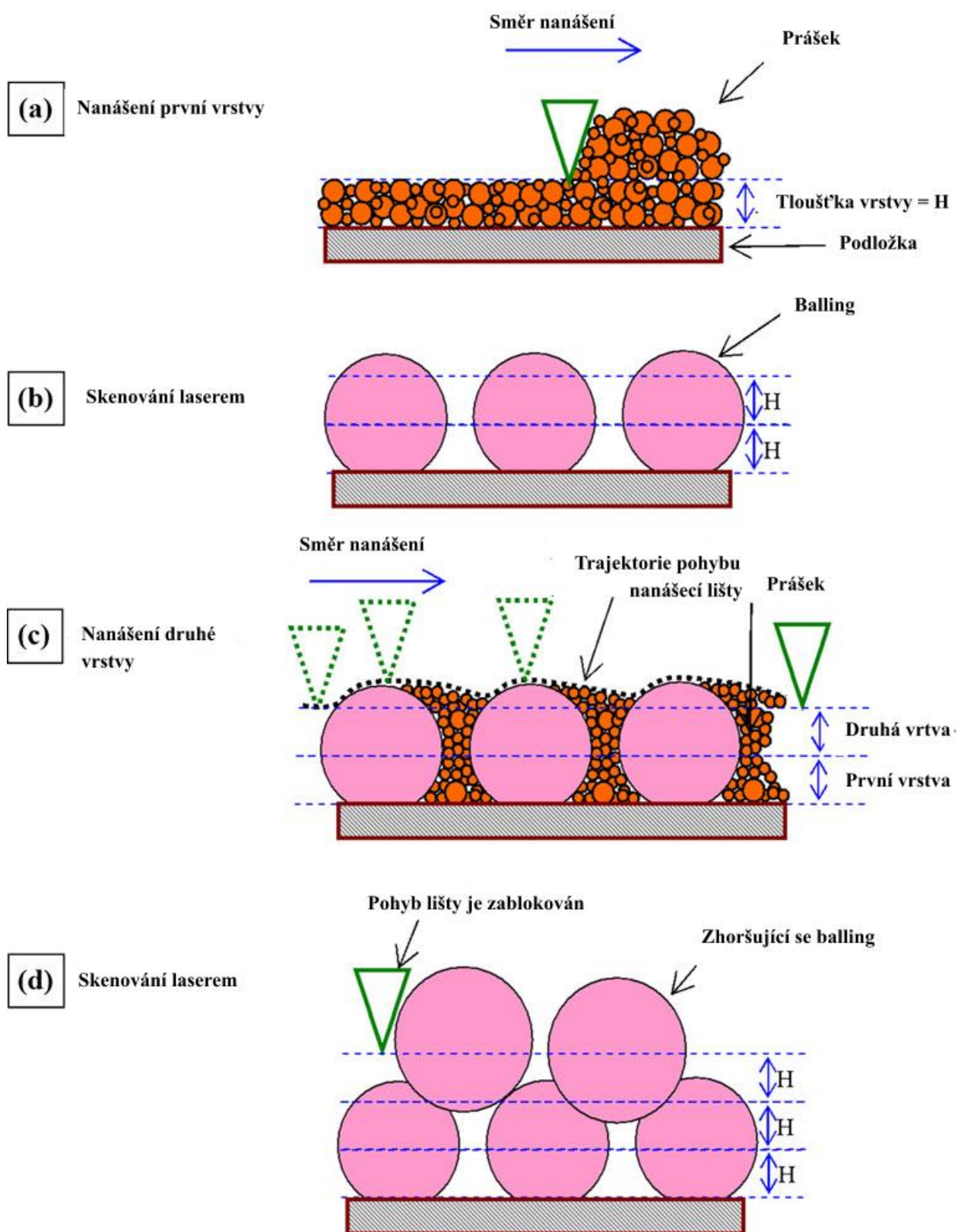
- kuličky o velikosti větší než 500 μm
- kuličky o velikosti přibližně 10 μm

Kuličky větší než 500 μm se tvoří kvůli zhoršené smáčivosti materiálu a jsou velice nežádoucí během SLM procesu, zatímco druhý typ kuliček nemá na proces SLM žádný vliv.

Tento efekt má tři hlavní negativní dopady. Prvním negativním dopadem je možné zvýšení drsnosti povrchu a tedy vyrobená SLM součást vyžaduje následné povrchové úpravy, které nejsou v tomto případě jednoduché a mohou vést k rozměrovým nepřesnostem. Druhým negativním dopadem je vznik pórů mezi shlukem těchto kuliček, které mají za důsledek zhoršení mechanických vlastností součásti. A třetím negativním dopadem je bobtnání kuliček během skenování, což brání dávkovači prášku se plynule posouvat a případně poškrábat povrch součásti. V nejhorších případech dochází ke kompletnímu zastavení celého procesu tisknutí. [16]

V závěru práce je popsáno, že tento fenomén je možné redukovat snížením obsahu kyslíku v ochranné atmosféře. Kdyby byl obsah kyslíku roven 0,1 %, mohlo by to mít za výsledek mnohem hladší strukturu povrchu bez tvorby kuliček. Při standardním obsahu kyslíku v ochranné atmosféře kolem 2 % se bohužel tento jev bude nevyhnutelně vyskytovat. Dále bylo vyvozeno, že za předpokladu, že by energetická hustota laseru byla opravdu vysoká – tedy vysoký výkon laseru a nízká rychlost skenování, tak by k balling efektu taktéž nedocházelo z důvodu zvýšené smáčivosti materiálu. Skenovací interval nehraje žádnou zřejmou roli v tvorbě kuliček na povrchu. V neposlední řadě vyvodili, že by se dalo zabránit tvorbě kuliček na povrchu, kdyby se materiál vícekrát přetavil. [16]

Jako zajímavost z této práce lze zmínit, že testy byly prováděny na vzorcích z niklu a u něj by taktéž platilo, že zvýšení výšky nanášené vrstvy by zabraňovalo tvorbě kuliček na povrchu, což je podobný výsledek jako u jiného testu s nerezovou ocelí 316L (1.4404). Tato podobnost naznačuje, že balling efekt je s největší pravděpodobností univerzální. [16]



Obrázek 5.3.1: Schématický diagram znázorňující tvorbu kuliček a jejich vliv na pohyb dávkovače [14]

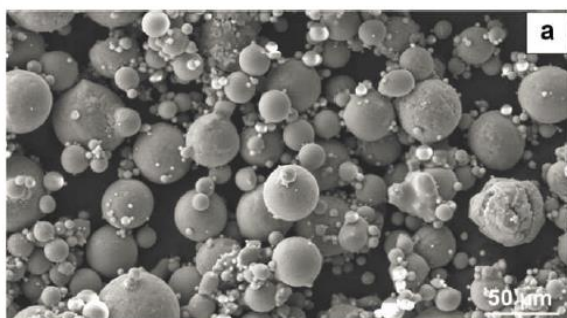
6. Materiál a použité metody

V této práci byla jako experimentální vzorek použita hliníková slitina EN AW 2618A v práškové formě a ve formě tyčí tažených za studena. Chemické složení je uvedeno v tabulce č. 1. [17]

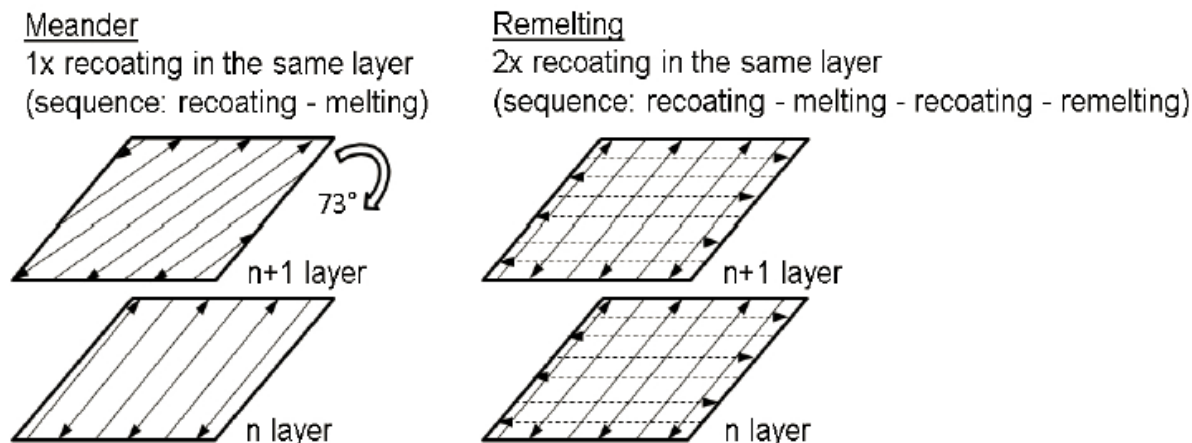
V dodaném prášku byly obsaženy částice o velikosti v rozmezí 20 – 63 μm (obrázek 6.1.1a). Před výrobou vzorků byl prášek vysoušen v univerzální peci, za teploty 70 °C po dobu 5 hodin, aby došlo k odstranění přebytečné vlhkosti. Válcové tyče o průměru 14 mm a délce 82 mm (obrázek 6.1.1b) byly vyrobeny za použití metody SLM v konvenčním zařízení SLM 280 HL vybavené vláknovým laserem YLR o výkonu 400 W (400 W YLR fiber laser). Tyto válce byly stavěny za použití stavěcí platformy v regulované inertní dusíkové atmosféře. Platforma o rozměru 100 x 100 mm byla zahřata na teplotu 80 °C. Použité procesní parametry byly následující: výkon laseru 200 W, rychlost skenování 100 mm/s, vzdálenost tracků 110 μm , výsledná energetická hustota 364 J/mm³ a výsledná rychlost stavby součásti 0,55 mm³/s. Tloušťka jedné vrstvy byla nastavena na hodnotu 50 μm . V průběhu tvorby vzorků bylo použito dvou skenovacích strategií (meandr a remelt, obr. 6.2). V případě remeltu bylo použito druhého nanášení prášku za účelem vyplnění případných materiálových vakancí v předchozích vrstvách a následně se přebytečný prášek smetl a provedlo se opětovné skenování předchozí vrstvy. [17]

Tabulka č. 1: Chemické složení testované slitiny a použitého prášku

Materiál	Složky v hmotnostních %								
	Fe	Si	Mn	Ni	Ti	Cu	Mg	Zn	Al
EN-AW-2618	1.10	0.24	0.04	1.20	-	2.50	1.50	0.04	zbytek
SLM prášek	1.00	0.149	-	1.22	0.20	2.66	1.39	-	zbytek



Obrázek 6.1: a) SEM mikrofotografie práškových částic, b) stavební pozice tyčí na stavební platformě [17]



Obrázek 6.2.: Popis použitých skenovacích strategií během tvorby vzorků [17]

6.1. Příprava metalografických výbrusů

Vzorky pro obrazovou analýzu byly připraveny pomocí konvenčního mokrého broušení a mechanického leštění pomocí diamantové pasty, kdy v průběhu broušení byly vzorky smáčeny ethanolem.

Poté byla provedena analýza relativní hustoty vzorků na světelném mikroskopu Zeiss Axio Observer Z1m a chemická analýza na elektronovém mikroskopu Zeiss Ultra Plus. Po vyhodnocení veškerých vzorků bylo provedeno leptání za pomoci leptací směsi Fuss (chemické složení HF: 7,5 ml, HCl: 25 ml, HNO₃: 8 ml, destilovaná voda: 1000 ml).

Analýza byla prováděna v podélném a příčném řezu v obou stavech (tj. meandr a remelt).

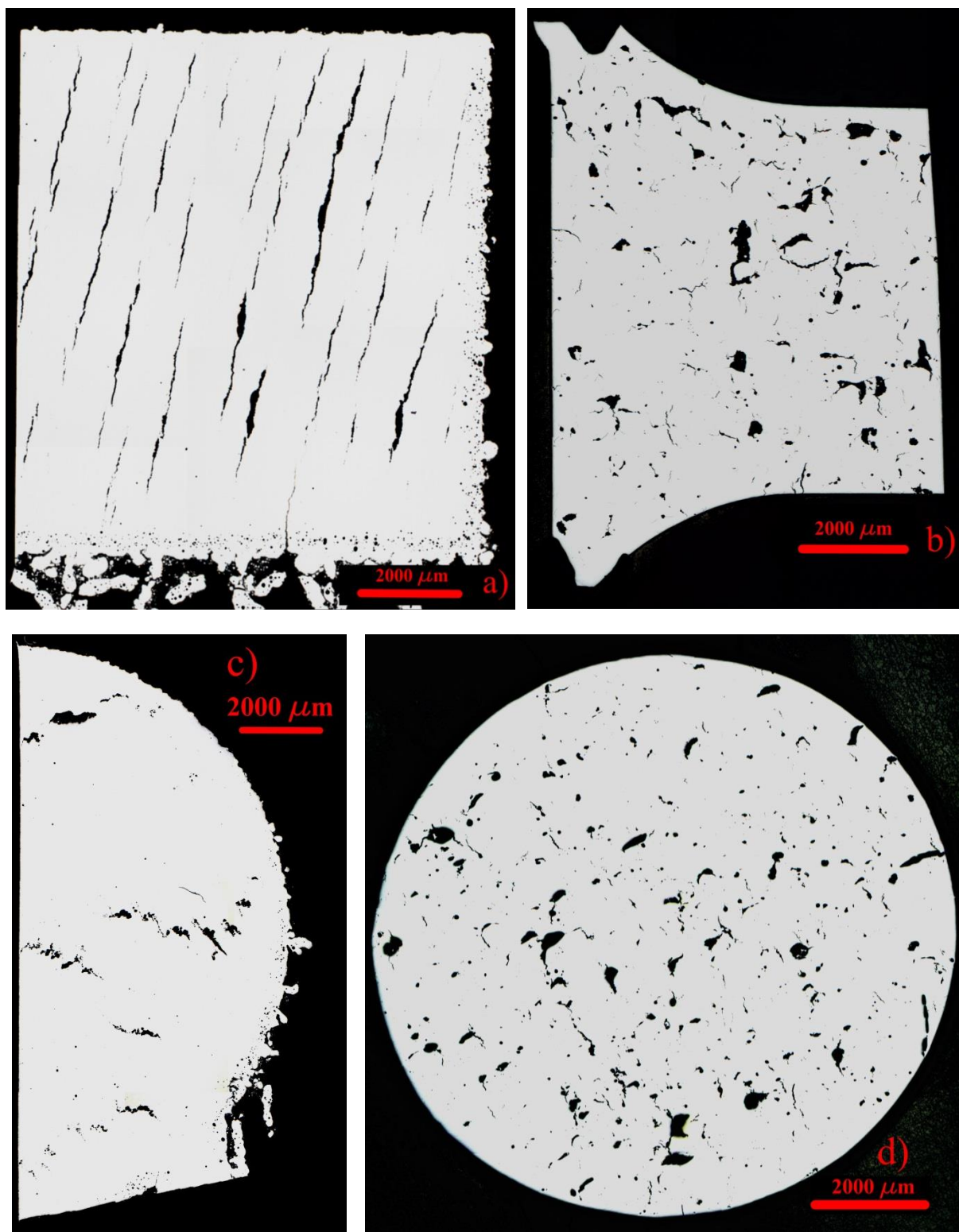
7. Výsledky a diskuze

Fotky vzorků byly před leptáním upraveny za pomoci histogramu barevných pixelů, kde byl histogram upraven tak, aby tmavé barvy na fotkách byly tmavší a světlé barvy světlejší a tím došlo k eliminaci polovičně osvětlených pixelů na pomezích pórů a trhlin. (Číselné údaje a graf histogramu nejsou v této práci uvedeny, jelikož při různých nastaveních histogramů, měly výsledné pixely rozdíl v řádu desítek, tedy chyba byla otázkou tisíců výsledků.) Následně byla fotka posterizována za účelem vytvoření binární fotky a tato fotka analyzována v histogramu, který určil celkový počet pixelů a počet bílých pixelů na fotce. Tyto údaje byly zapsány do tabulky č. 2. Z tabulky je možné vyvodit, že vzorky se skenovací strategií remelt mají vyšší relativní hustotu materiálu.

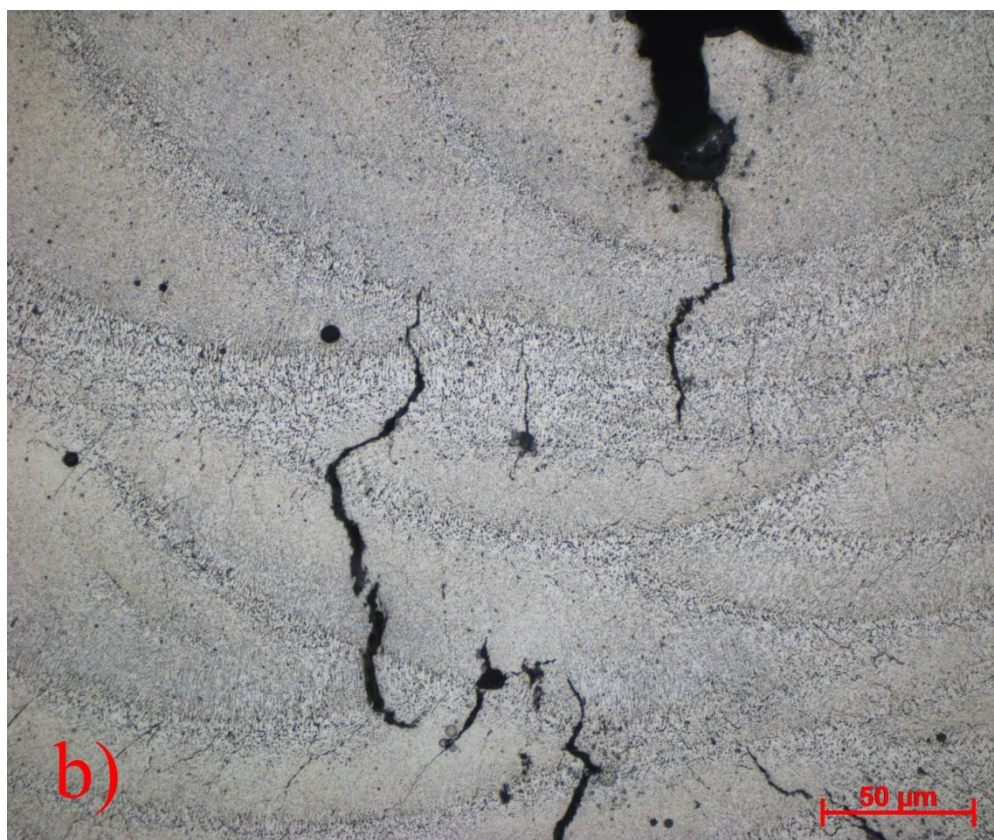
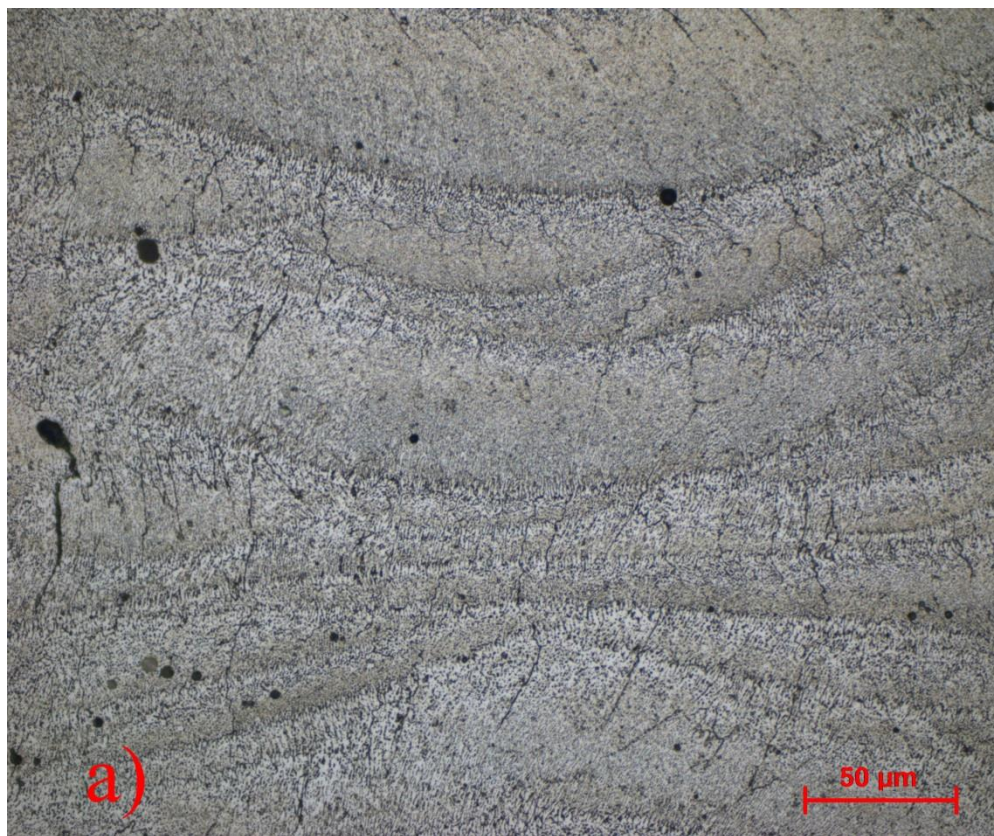
Tabulka č. 2: Analýza a porovnání pixelů na fotkách vzorků

Popis vzorku	Příčný meandr	Podélný meandr	Podélný remelt	Příčný remelt
Počet bílých pixelů	11275557	8531008	13078250	10534079
Celkový počet pixelů	11910299	9078204	13650588	10840900
Relativní hustota v %	94,67	93,97	95,81	97,17

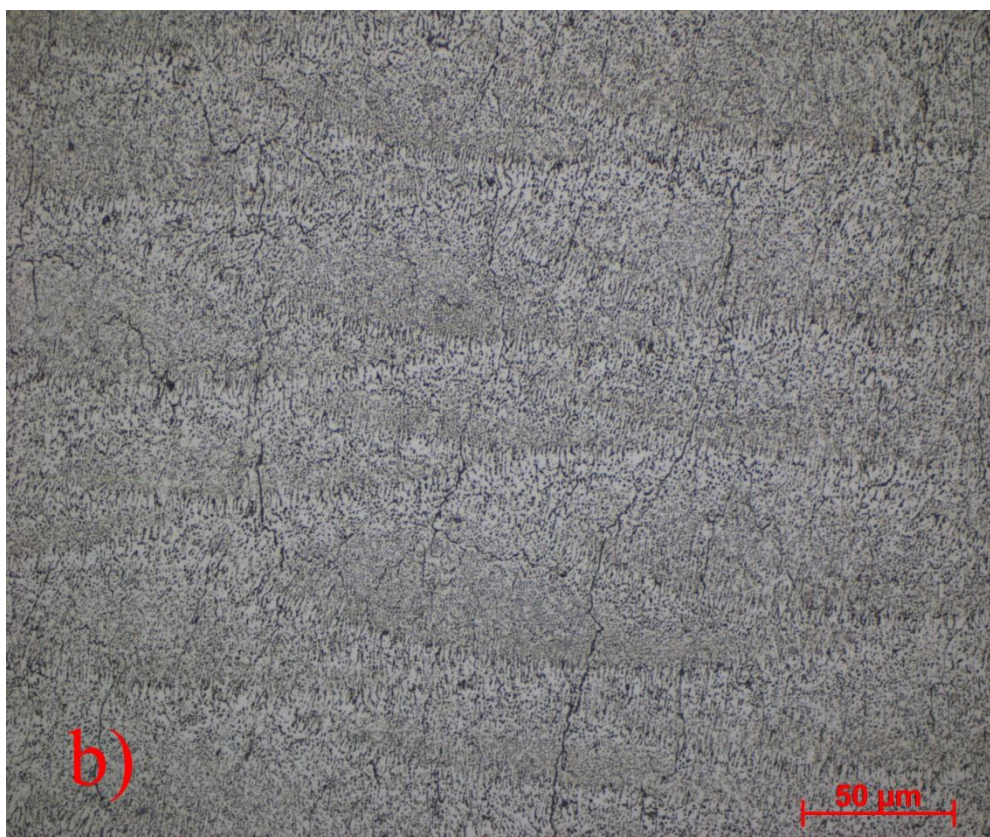
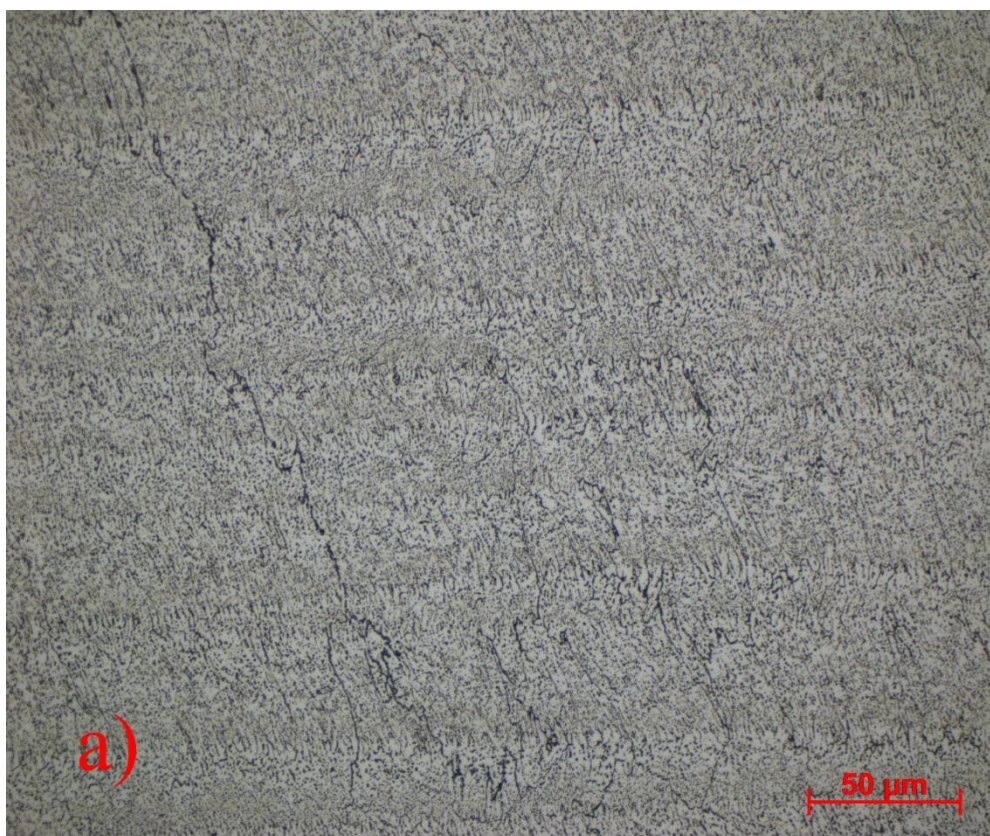
Z fotografií vzorků (obr. 7.1.) jsme schopni provést analýzu trhlin a pórovitosti. U vzorků typu meandr můžeme sledovat početné shluky pórů a menší množství trhlin, ale nikoliv zanedbatelné, které bývají kratší než je tomu u vzorků typu remelt. U vzorků typu remelt již nejsme schopni zpozorovat shluky pórů, ale pouze trhliny v materiálu. Přestože na základě výsledků vedla strategie remelt ke zvýšení relativní hustoty, celková morfologie trhlin se změnila natolik, že výsledné mechanické vlastnosti slitiny dosahovaly extrémně nízkých hodnot (dle Pantělejeva et al. [17]).



Obrázek 7.1.: Celkový pohled: remelt a) podélný řez, c) příčný řez;
meandr b) podélný řez, d) příčný řez



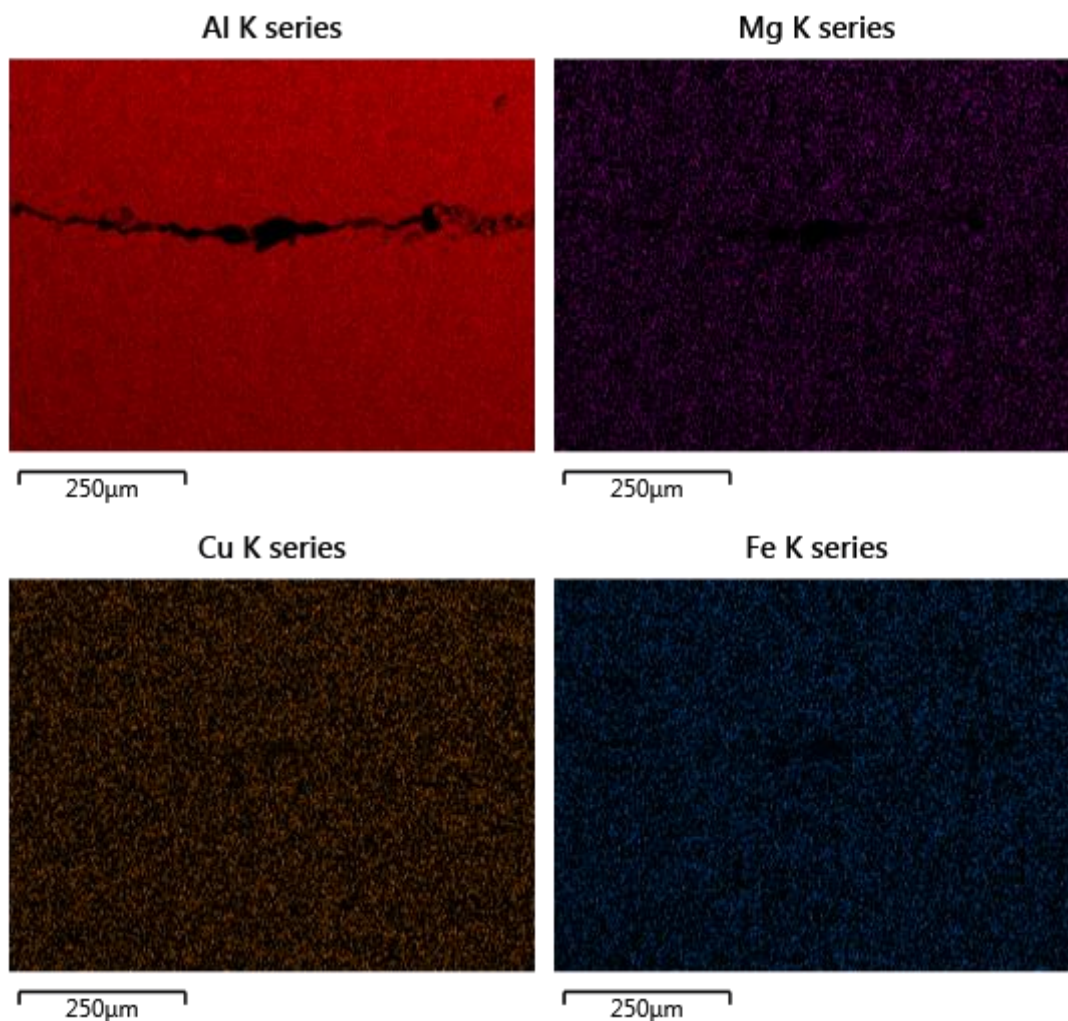
Obrázek 7.2.: Fotografie naleptaných vzorků stav meandr
a) příčný řez, b) podélný řez



*Obrázek 7.3.: Fotografie naleptaných vzorků stav remelt
a) příčný řez, b) podélný řez*

Na fotografiích u obou typů vzorků v naleptaném stavu (obr. 7.2. a 7.3.) můžeme sledovat jasné rozložení tracků a směry trhlin, jež cestují napříč tracky. V práci od *Ghainiho et al.* [18] bylo popsáno šíření solidifikačních trhlin, které probíhá nepřerušovaně napříč jednotlivými svary, tj. napříč oblastmi s velkou zrnitostí a různorodým prostředím. Tento charakter by teoreticky odpovídal šíření trhlin napříč tracky, které můžeme sledovat na naleptaných vzorcích.

Z prvkové mapy (obr. 7.4.) je možné usoudit, že v okolí trhlin vzorků se nenachází materiálové eutektikum, které by napovídalo o likvačním charakteru trhlin.



Obrázek 7.4.: Prvkové mapy vzorku ve stavu remelt (Al, Mg, Cu, Fe)

Z technických důvodů nebylo možno pořídit prvkové mapy vzorku ve stavu meandr, proto byl charakter trhlin určen pouze na základě jejich morfologie (obr. 7.2) porovnané s informacemi v kap. 5.2. Na základě těchto informací je možné prohlásit trhliny ve vzorku typu meandr s největší pravděpodobností za solidifikační.

V případě vzorku typu remelt je možné říci, že pokud by se v našem případě mělo jednat o likvační trhliny, musela by prvková mapa alespoň částečně odpovídat rozložení již zmíněných trhlin. Jelikož morfologie trhlin u vzorků ve stavu remelt taktéž nevypovídá o likvačním charakteru trhlin (jsou větší, cestují napříč tracky a jejich tvar a směr odpovídá získaným informacím z jiných prací) je možné říci, že se i v tomto případě jedná převážně o trhliny solidifikačního charakteru.

8. Závěr

V první části práce byla provedena rešerše, kde je zkoumán a popsán vliv procesních parametrů SLM u součástí strukturně podobných hliníkových slitin. Parametry, které nejvíce ovlivňují výslednou strukturu, jsou výkon laseru, rychlost skenování, teplota stavební platformy a skenovací strategie. Dále byl prozkoumán negativní vliv hliníkových slitin u tvorby součástí metodou SLM.

V experimentální části byla zkoumána materiálová struktura vzorků, příčina a charakter jejich materiálových vad a jejich výsledná relativní hustota. Bylo zjištěno, že vzorky vytvořené strategií remelt vedou k vyšší relativní hustotě u objemných vzorků oproti vzorkům typu meandr, ale podstatně horším materiálovým a únavovým vlastnostem, které můžeme pozorovat ve výsledcích jiných prací. Vzorky vyrobené strategií remelt kvůli tomuto faktu obsahují méně pórů, ale mnohem více trhlin.

Na základě dostupných dat z rešerše a výsledného lokálního chemického složení provedeného u vzorků meandru i remeltu je možné říci, že charakter trhlin u obou vzorků není likvační, nýbrž solidifikační.

Proces optimalizace tvorby součástí ze slitiny 2618 metodou SLM by vyžadoval další výzkumnou práci, jelikož dosavadní dostupné znalosti o tom, jak efektivně ovlivnit zmíněný proces, jsou nedostatečné. S největší pravděpodobností optimalizace tohoto procesu bude spočívat v nalezení správné kombinace výše zmíněných procesních parametrů. I přesto že strategie remelt vede u některých materiálů k výraznému zvýšení relativní hustoty a s tím související zlepšení mechanických vlastností, u této slitiny je zvýšení relativní hustoty spíše menší a navíc dochází k takové změně morfologie trhlin, která vede k razantnímu zhoršení mechanických vlastností. Z tohoto důvodu by se u této slitiny strategie remelt neměla používat.

9. Seznam použitých zdrojů

- [1] SEDLÁČEK, Karel. Aditivní technologie na vlně všeobecného zájmu. *Technický portál* [online]. Praha: Business Media CZ, 16. 1. 2018 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/veda-vyzkum-inovace/aditivni-technologie-na-vlne-vseobecneho-zajmu_43045.html
- [2] CUMMINS, Kate. The rise of additive manufacturing. In: *The Engineer* [online]. United Kingdom: Centaur Media, 2010 [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: <https://www.theengineer.co.uk/issues/24-may-2010/the-rise-of-additive-manufacturing/>
- [3] HULL, Charles W. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. Přihlášeno 8. srpen 1984. Uděleno 11. březen 1986.
- [4] BUCHBINDER, Damien, H. SCHLEIFENBAUM, S. HIEDRICH, W. MEINERS a J. BÜLTMANN. High Power Selective Laser Melting (HP SLM) of Aluminum Parts. *Physics Procedia* [online]. 2008, **2011**(12), 271-278 [cit. 2018-03-04]. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.035. ISSN 1875-3892. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389211001143#>
- [5] LOUVIS, Eleftherios. Selective laser melting of aluminium components. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2011, **211**(2), 275-284 [cit. 2018-02-18]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.09.019>. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013610003018>
- [6] GEBHARDT, Andreas, Jan-Steffen HÖTTER a Dawid ZIEBURA. SLM Process Scheme. In: *RTejournal - Forum für Rapid Technologie* [online]. University in Aachen, Germany: University in Aachen, Germany, 2004 [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: <https://www.rtejournal.de/ausgabe11/3852/dippArticle-1.png>
- [7] PAGÁČ, Marek. Technologie 3D tisku kovů (SLM). In: *Konstrukter.cz* [online]. Česká republika: Vydavatelství Nová média, 2014 [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/2016/11/23/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/>
- [8] KURZYNOWSKI, Tomasz, Edward CHLEBUS, Bogumiła KUŹNICKA a Jacek REINER. Principle of the SLM technology. In: *Research Gate* [online]. Wroclav: Wroclaw University of Science and Technology, 2012 [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Tomasz_Kurzynowski/publication/234118523/figure/fig1/AS:300043786571776@1448547421210/Principle-of-the-SLM-technology.png
- [9] ATTA, Talha. Comparison between Selective Laser Melting (SLM) and Selective Laser Sintering (SLS). In: *Green Mechanic* [online]. online: Green Mechanic, 2012 [cit. 2018-02-25]. Dostupné z: <http://www.green-mechanic.com/2016/12/comparison-between-selective-laser.html>

- [10] T. ABOULKHAIR, Nesma, Nicola M. EVERITT, Ian ASHCROFT a Chris TUCK. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive Manufacturing* [online]. 2014, **2014**(1-4), 77-86 [cit. 2018-02-24]. DOI: 10.1016/j.addma.2014.08.001. ISSN 2214-8604. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860414000062?via%3Dihub>
- [11] OLAKANMI, E. O., R. F. COCHRANE a K. W. DALGARNO. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. *Progress in Materials Science* [online]. 10-2015, (Vol. 74), 401-477 [cit. 2018-04-11]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.03.002>. ISSN 0079-6425. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642515000389>
- [12] BRANDL, Ernhard, Ulrike HACKENBERG, Vitus HOLZINGER a Damien BUCHBINDER. Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior. *Materials & Design* [online]. 02-2012, (Vol 34.), 159-169 [cit. 2018-04-11]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.07.067>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306911005590>
- [13] KEMPEN, K., L. THIJS, E. YASA, M. BADROSSAMAY, W. VERHEECKE a J. -P. KRUTH. PROCESS OPTIMIZATION AND MICROSTRUCTURAL ANALYSIS FOR SELECTIVE LASER MELTING OF AlSi10Mg. *SOLID FREEFORM FABRICATION PROCEEDINGS* [online]. 2011, , 484-495 [cit. 2018-05-21]. ISSN 1053-2153. Dostupné z: <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2011/2011-37-Kempen.pdf>
- [14] SHEIKHI, M., F. Malek GHAINI, M.J. TORKAMANY a J. SABBAGHZADEH. *Characterisation of solidification cracking in pulsed Nd:YAG laser welding of 2024 aluminium alloy* [online]. In: . [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1179/136217108X386554>
- [15] NIKOLAY K. TOLOCHKO, SERGEI E. MOZZHAROV, IGOR A. YADROITSEV, TAHAR LAOUI, LUDO FROYEN, VICTOR I. TITOV a MICHAIL B. IGNATIEV, (2004) "Balling processes during selective laser treatment of powders", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 10 Issue: 2, pp.78-87, <https://doi.org/10.1108/13552540410526953>
- [16] LI, Ruidi, Jinhui LIU, Yusheng SHI, Li WANG a Wei JIANG. Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 04-2012, (Volume 59), 1025-1035 [cit. 2018-04-11]. DOI: DOI 10.1007/s00170-011-3566-1. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00170-011-3566-1.pdf>
- [17] PANTĚLEJEV, Libor, Daniel KOUTNÝ, David PALOUŠEK a Jozef KAISER. Mechanical and Microstructural Properties of 2618 Al-Alloy Processed by SLM Remelting Strategy. *Materials Science Forum; Pfaffikon* [online]. 2017, Březen 2017, (891), 343-349 [cit. 2018-05-17]. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.891.343>. ISSN 02555476. Dostupné z: <https://search.proquest.com/docview/1880552024?accountid=17115>

[18] GHAINI, F. Malek, M. SHEIKHI, M.J. TORKAMANY a J. SABBAGHZADEH. The relation between liquation and solidification cracks in pulsed laser welding of 2024 aluminium alloy. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 27-04-2009, **1-2**(519), 167-171 [cit. 2018-05-21]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.04.056>. ISSN 0921-5093. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509309005528>

10. Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka	Popis
3D	Třidimenzionální
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
FDM	Fused Deposition Modeling
DMLS	Direct Metal Laser Sintering